

ラジオロジー

放射線医療と市民のみなさんを結ぶ広報誌

39
2022年

特集◎MRリニアック

千葉大学大学院医学研究院
画像診断・放射線腫瘍学 宇野 隆(うの たかし)

■世界の街角から
青の都 サマルカンド(ウズベキスタン)

滋賀医科大学放射線医学講座
渡邊 嘉之(わたなべ よしゆき)

■My Hobby
私にとっての『ランニング』…そして「キモチ良い汗」
大阪公立大学医学部附属病院
市田 隆雄(いちだ たかお)

患者さんに

やさしい放射線医学を求めて…

ラジオロジー(Radiology)とは放射線科学のことです。

ラジオロジーは体の中を切らず診るための科学です。エックス線写真からはじまり、日々に進歩しています。

日本ラジオロジー協会

「みえる・わかる・なおる」をテーマとして放射線科学は医療に幅広く貢献しております。

[特集]

MRリニアック

千葉大学大学院医学研究院
画像診断・放射線腫瘍学

宇野 隆 (うの たかし)

はじめに

がん放射線治療は日本で年間およそ25万人が受けるがん治療です。科学技術の進歩が直接治療装置の性能向上に反映されるため、近年著しく進歩を遂げて、高精度放射線治療と呼ばれるようになりました。強度変調放射線治療(IMRT)、体幹部定位放射線治療(SBRT)、粒子線治療などの優れた線量分布により、正常組織を避けつつがんに集中してより高い線量を投与することができるようになってきました。しかし、そのことは逆に体内での臓器の動きなどを正確に評価して照射しないと、コンピュータの創り出す線量分布が体の中で再現されず、かえって放射線ががんに当たり損なうリスクがあることを意味します。そこで最近では、いかに正確に照射するかということが、線量分布以上に重要視されるようになりました。その鍵となるのが画像誘導技術です。画像誘導放射線治療(image-guided radiation therapy: IGRT)とは、放射線治療装置に搭載された画像診断システムを用いてがんや正常組織の位置を確認することで、放射線をより正確に照射する放射線治療技術のことです。

MRリニアックの登場

現在最も普及しているIGRTは、治療装置に搭載されたcone-beam CTなどのCTを使用したIGRTです。しかし、cone-beam CTでは、画像診断用CTで得られる画像と比較すると画質が十分ではないため、さらなる精度向上を目指してMRを画像誘導に用いる研究が長く続けられました。そして近年、MRを放射線治療装置に組み込んだMRリニアックが開発され、がん放射線治療に用いられるようになりました。従来のCTによるIGRTは、治療開始前にあらかじめCTシミュレータで撮影したCT画像をもとに治療計画装置を用いて治療計画を行っていました。そして、実際の照射直前に治療寝台上でcone-beam CTによる位置の確認、あるいは照射中にX線透視またはマーカ追尾などによって間接的に位置の確認を行っていました。MRリニアックの登場により、コントラスト分解能に優れたMRによるがんや正常組織の位置のより正確な評価、治療直前のMR所見にもとづく再プランニング、放射線照射中のリアルタイムモニタ (beam-onモニタ) などが可能となりました。MR画像誘導は「放射

線治療中の体内が見える化された」画期的なIGRT技術です。がん放射線治療は新たな次元に入り、臨床の場において新しい高精度放射線治療が患者に提供されることとなりました。MRリニアックは現在2種類の装置が臨床の現場で稼働しています。このうちElekta社製のMRリニアックは、1.5テスラMRを搭載した世界初の高磁場MR一体型高精度放射線治療装置です(図1)。ここでは、その技術的特徴や今後への期待と課題、そして初期臨床経験について記載します。

図1. Elekta Unity 1.5テスラMRリニアックシステム
(千葉大学医学部附属病院)



ボアの直径は70cmで奥行きは132cm。ビームエネルギーはFlattening Filter Free 7 MVで線源回転軸間距離(SAD)143.5cm、照射野最大径は頭尾側22cm×左右57.4cm、治療はStep & Shoot IMRTによって行われ、線量率は425 MU/min、ガントリー回転速度は6 RPM、MLC/ダイアフラム移動速度は6 cm/s、コリメータは90度固定で80対のMLCは頭尾方向に駆動する。

磁場強度	: 1.5T*
ビームエネルギー	: 7 MV FFF
照射野サイズ	: 22 (Sup/Inf) × 57.4 (left/right) cm ²
照射方法	: Step & Shoot IMRT
線量率	: 425 MU/min
ガントリー回転速度	: 6RPM
MLC	: 160 (80対)
MLC移動速度	: 6cm/s

* Philips社製1.5T-MR

技術的特徴

1.5テスラMR リニアックは1999年にユトレヒト大学医療センターのラーヘンダイク教授が着想した治療装置で、2000年の欧州放射線腫瘍学会(イスタンブール)で最初に発表されました。その後、研究開発が続けられ、20年近くの間をかけて装置が完成しました。2018年6月にEUにおけるCE Markを取得、同12月に米国FDAを取得して、日本では翌2019年5月に製造販売承認を取得しました。2020年11月より千葉大学医学部附属病院に設置が開始され、コロナ禍の影響で遅延しましたが2021年12月に治療が開始されました。

装置の構造は、1.5テスラMRのマグネットを取り囲むようにその外側にリニアックの大型回転ガントリーを備え、マグネ

トロン、3極電子銃、Sバンド定在波加速管を配置しています(図2)。電子銃から放出された電子が加速管に達するように、主磁場の均一度を維持しつつ、電子銃を含むドーナツ状の空間の磁場強度が弱くなるように設計されていて、その部分から治療ビームが照射される構造となっています。ボアの直径は70cmで奥行きは132cmあります。ビームエネルギーはFlattening Filter Free 7MVで線源回転軸間距離(SAD)143.5cm、照射野最大径は頭尾側22cm×左右57.4cm、治療はStep & Shoot IMRTによって行われ、線量率は425MU/min、ガントリー回転速度は6RPM、MLC/ダイアフラム移動速度は6cm/s、コリメータは90度固定で80対のMLCは頭尾方向に駆動します。MRにはT1強調画像、T2強調画像、IR画像、拡散強調画像および二次元のシネ画像が用意されていて、シネMR画像を撮影することで、照射中にはほぼリアルタイムで患者の体内を観察することができます。

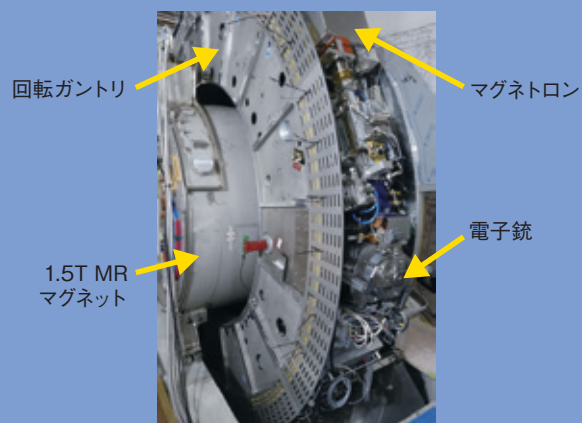
高い磁場は放射線治療で発生する二次電子に影響を与えます。線量分布への影響があり、ローレンツ力により磁場と平行な頭尾方向の平面では軸外線量比(OCR)が左右

対称となる一方で、磁場と垂直な平面ではOCRが非対称となります(図3)。Electron Return Effectは、組織内で生じた二次電子が密度の粗な物質中で磁場によって回転して戻る現象で、肺、副鼻腔、消化管ガスなど空気と組織との境界面で顕著となります。治療計画装置ではモンテカルロ計算によってモデル化されていて、線量の計算に考慮されています。もう一つは、Electron Streaming Effectと呼ばれ、照射野されていないところの皮膚線量を増加する可能性があります。乳房、胸部などの照射時には治療計画装置で線量分布を確認して遮蔽する必要があります。

MRリニアックによる画像誘導放射線治療の長所

1.5テスラMRリニアックシステムでは、従来のCTによる画像誘導と比較して、①コントラスト分解能の良い高磁場MR(図4)を用いることでより正確な治療計画と画像誘導が可能であること、②照射直前のMRをもとにその日その時のがんと正常組織の位置、形状変化に対応した再プランニング(即時適応)ができること、③リアルタイムのMRシネ画像で病変

図2. Elekta Unityの内部構造



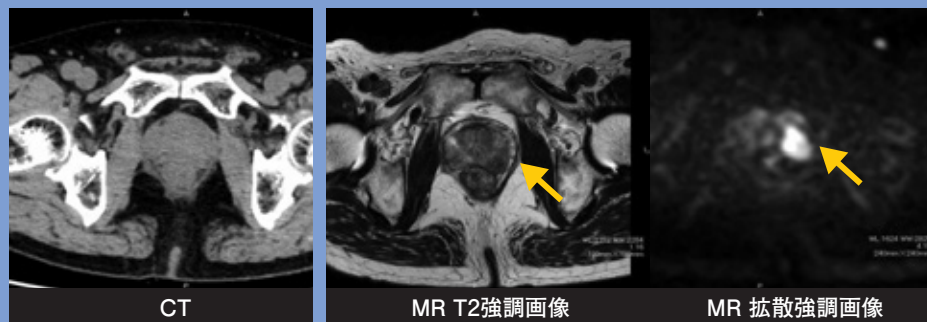
1.5テスラMRのマグネットを取り囲むようにその外側にリニアックの大型回転ガントリーを備え、マグネトロン、3極電子銃、Sバンド定常波加速管を配置する。

図3. 磁場による線量分布への影響

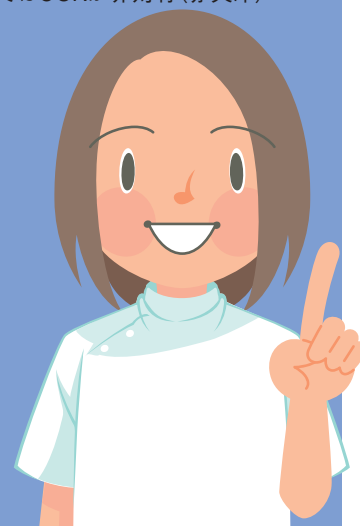


高い磁場は放射線治療で発生する二次電子に影響を与える。線量分布への影響があり、ローレンツ力により磁場と平行な頭尾方向の平面では軸外線量比(OCR)が左右対称となる(青矢印)一方で、磁場と垂直な平面ではOCRが非対称(赤矢印)となる。

図4. MRと単純CTによる前立腺の描出の違い



コントラスト分解能の高いMRでは単純CTでは困難な前立腺がん(矢印)の描出が可能な場合がある。



や周囲正常組織の動き、照射範囲を観察しながら照射できること、④Diffusionなど機能画像を用いた治療計画や即時適応、レスポンスの評価が可能であること、などの利点があります(図5)。これらの長所は、がんに対するより正確な線量投与と照射マージンの縮小による正常組織の被曝低減によってdose-volume histogram (DVH)パラメータの向上をもたらすことで、各種がん治療における1回線量の増加と分割回数の減少、寡分割照射の適応を拡大・推進する方向にあります。2020年の海外からの報告によると、脳腫瘍と頭頸部がんを除く、膵がん、前立腺がん、リンパ節再発などへの分割回数は概ね5回となっています。

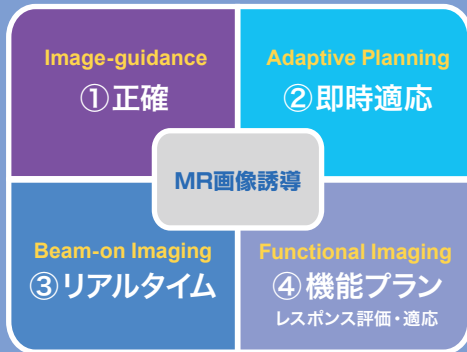
MR画像誘導即時適応放射線治療

MRリニアックでは、通常の放射線治療とは異なり、あらかじめ作成した治療計画通りに放射線治療を行うことはありません。放射線治療直前に治療装置の寝台上で撮影したMR画像を用いて、その日その時のがんや正常組織の位置や動きにすぐに対応して治療計画を修正して最適化する再プランニングが行われます。MR画像誘導即時適応放射線治療(MR-guided on-line adaptive radiation therapy)と呼ばれ

る新しい放射線治療方法です。1.5テスラMRリニアックの治療計画装置にはAdapt to Position (ATP)とAdapt to Shape (ATS)の2つの機能が搭載されています。ATPでは剛体レジストレーション(rigid registration)という方法で画像を一致させ、照射部の位置ずれを算出し、再プランニングを行います。ATSでは主として非剛体レジストレーション(deformable image registration)という変形をとまう方法で画像を一致させ、さらにがんや正常組織の輪郭を修正します(図6)。輪郭修正後に線量処方、制約をもとに再プランニングがおこなわれます(図7)。ATPが位置修正主体の再プランニングであるのに対して、ATSは新たな輪郭情報を用いる完全な再プランニングであり、その分必要とする時間も長くなります。

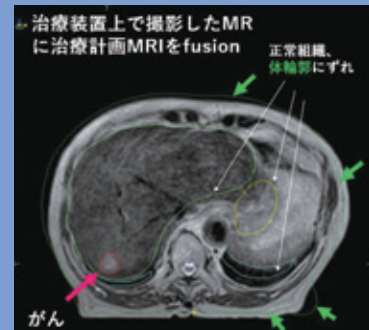
MR画像誘導即時適応放射線治療は、消化管のような常に位置変動がある放射線に弱い正常臓器と接するようながん治療では特に有用です。例えば、膵臓がんでは、がんが胃、十二指腸、小腸、大腸などに取り囲まれていて、その位置も日々時間ごとに変化します。MRではこれらの正常組織が明瞭に描出され、なおかつ変化に対応した再プランニングが行われます(図8、9)。

図5. MRリニアックによる画像誘導放射線治療の長所



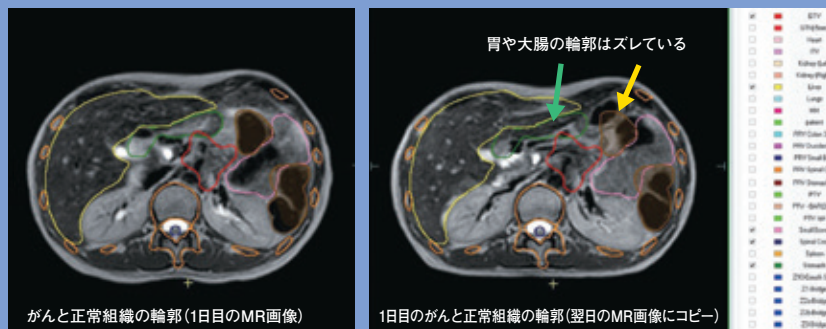
MR画像誘導では、コントラスト分解能に優れたMRを用いることでより正確な治療計画と画像誘導が可能であること、照射直前のMRをもとにその日その時のがんや正常組織の位置、形状変化に対応した再プランニング(即時適応)ができること、リアルタイムのMRシネ画像で病変や周囲正常組織の動き、照射範囲を観察しながら照射できること、Diffusionなど機能画像を用いた治療計画や即時適応、レスポンスの評価が可能であること、といった長所がある。

図6. がんや正常組織の輪郭修正



治療直前にMRリニアックで撮影したMRを正す。変形を伴う修正後に線量処方、shape [ATS]。

図8. 照射日による消化管の位置の違い



左は1日目のMR画像上で囲んだがんや正常組織の輪郭。右は2日目のMR画像にコピーした1日目のがんや正常組織の輪郭。消化管の位置が大きく変化していることがわかる。

図9. 局所進行再プランニング
図で、胃、小腸、を抑えつつがん線量を投与して



リアルタイムシネMR画像

1.5テスラMRリニアックシステムでは、直交3断面で200ミリ秒ごとのシネMR画像が表示可能です(図10)。体内がほぼリアルタイムに可視化されることで、治療直前に照射範囲とがんや正常組織の動きの確認を行い、放射線照射中には体内のモニタをすることが可能となりました(beam-onモニタ)。リアルタイムシネMR画像が表示されることで、いよいよ放射線治療も外科治療や内視鏡治療と同じようにがんを見ながら治療する時代となりました。

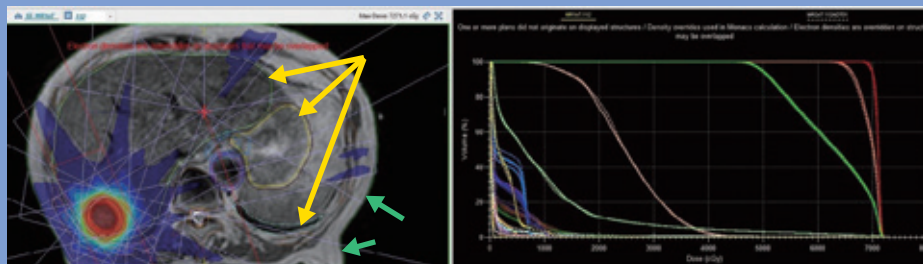
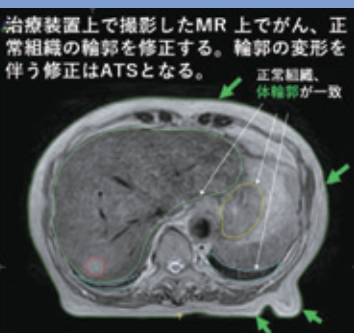
初期臨床経験と今後への期待と課題

2021年12月から2022年4月までに1.5テスラMRリニアックを用いて20症例に対してMR画像誘導即時適応放射線治療が行われました。肝臓がん、転移性肝がん、膵臓がん、腎臓がん、前立腺がん、リンパ節オリゴ転移、骨転移等が対象となりました。大部分の症例で5分割、処方線量35-50 Gyの体幹部定位放射線治療が施行されましたが、進行膵がんの1症例で8分割、骨転移の1症例で2分割が採用されました。ほぼすべての照射でATSによる再プランニングが行われ、患者入室から治療終了までに1時間以上を要しています。

急性反応等による照射休止は一例もなく、すべての症例で放射線治療が完遂できました。現在すべての症例で経過観察中です。

MRリニアックの登場により、これまで放射線治療において主流であったCTによる治療計画や画像誘導技術に革新的なパラダイムシフトを起こす可能性があります。治療計画と画像誘導にX線被曝やマーカ刺入等の侵襲がないMR単独での治療計画も研究が進んでいます。MR画像誘導即時適応放射線治療は、放射線治療の適応があるあらゆる疾患、特に、限局して高線量処方が必要とするがんが消化管などの正常組織と近接し、これらが日々位置の変動を伴うような場合に有用です。一方、今後の課題としてはMLC trackingの開発、VMATの導入、必要な人的資源の確保、治療時間の短縮とスループットの改善、装置導入のコスト低減などが挙げられます。MRリニアックの臨床導入と普及および有効性の検証は今後の放射線治療の発展のためにとっても重要です。日本放射線腫瘍学会を中心とする5学会が連携し、MR画像誘導即時適応放射線治療の医学物理的な定義や名称、施設要件、治療計画方法などを記載したガイドラインが作成されています。

図7. 輪郭修正後の再プランニングによる線量分布とDVH



上で、治療計画MRで作成した輪郭を修正制約をもとに再プランニング(adapt to

膵がんに対するMR画像誘導即時適応放射線治療

後の線量分布大腸への線量病巣には高い

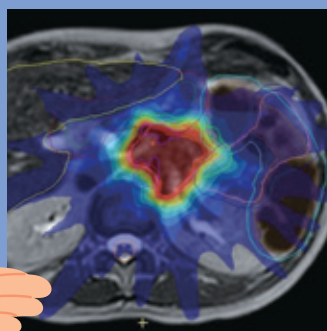
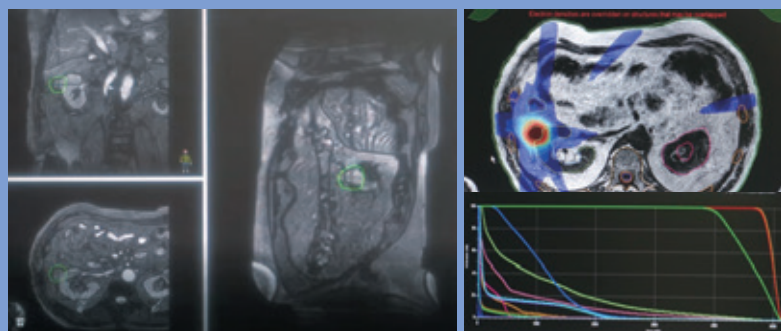


図10. 右腎がんに対するMR画像誘導即時適応放射線治療



直交3断面のシネMR画像(左、実際には動きのある画像)によるBeam-on imagingが可能である。右は再プランニング後の線量分布図とDVH。

世界の街角から

青の都 サマルカンド(ウズベキスタン)

滋賀医科大学放射線医学講座
渡邊 嘉之(わたなべ よしゆき)

皆さんはウズベキスタンという国がどこにあるか知っていますか？

サッカー愛好家なら日本代表がワールドカップ予選で戦っていたのでアジアの一国とは認知されているのではないのでしょうか。ウズベキスタンは中央アジア最大で中心的な国であり、古くからシルクロードの中継地として栄えていた歴史があります。コロナ禍が始まる前の2018年に首都であるタシケントで開催されたウズベキスタン放射線学会に参加する機会を得ました(写真1)。ウズベク語やロシア語での講演



写真1



写真2

を多く聴講しましたが放射線科医である私は画像に関しては理解でき、画像は世界共通語であることを強く実感できた経験でした。

学会後に足を延ばしてサマルカンド、ブハラを訪問しました。サマルカンドはタシケントから高速鉄道で2時間程度の距離にあり、14世紀末から繁栄したティムール王朝の首都であった中世の面影を強く残す街であり、世界遺産にも指定されています。タシケントからの車中からは砂地がメインの草原・高原が広がっており、喜多郎のシルクロードの音楽を聴きながら、かつてのキャラバン隊を思い描き、車中を過ごしました。



サマルカンドはモザイクスタイルと言われる青いタイルを多用したモスクを主体としたイスラム建築が多く見られ青の都と言われている(写真2)。その中心部はレギスタン広場(写真3)であり、3棟の神学校とモスクで構成されています。内部は青と金の綿密な内装が行われており、見るものを魅了する建物でした(写真4)。

旅の途中でガイドの案内でサマルカンド医学校を見学しました。教室では医学生が各自1台用意されたPCの前で授業を受けていた(写真5)。歴史ある建物の中で多くのシミュレーション装置も準備されており、日本の医学部より環境が整備されているのではとも感じました。

サマルカンドはシルクロードのオアシスとして古くから栄え、多くの民族が混じり合い、またホスピタリティの高い街として知られている。実際に街角でもアジア系、インド系、アラブ系、ロシア系などの住民と多くすれ違い、親切な方が多い印象でした。また、食事もプロフ(炊き込みご飯)やナン、シャシリク(羊肉の串焼)など日本人の口にも合う美味しいもので、歴史を感じる楽しい時間を過ごすことができました。

ここ数年は渡航制限により海外出張や旅行に行けてないが、自由に各国を訪問できる日が早く来てほしいものである。

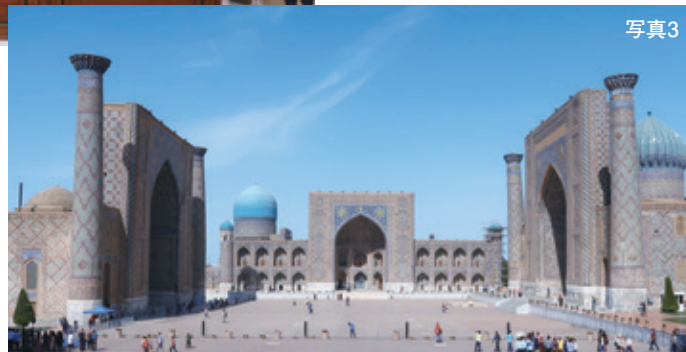


写真3



写真4



写真5

My Hobby

私にとっての『ランニング』
…そして『キモチ良い汗』

大阪公立大学医学部附属病院
市田 隆雄(いちだ たかお)

さて、趣味がなにか?と尋ねられたら、その答えは一つです。
『キモチ良い汗』をかくのが好きで色々とスポーツをしてきました。その中の一つ!『ランニング』と申せます。

昔々の小学時から距離の長いランが得意でした。今となれば『ランニング』を始めた動機は不明ですが、中学1年時の夏休みの早朝ランが始まりだったような気がします。友人と3人で、自宅(大阪)に近い長居競技場まで自転車でかけつけ、公園内の外周道路をラン1周する日課としてスタート。その外周道路の1周は2.813キロで、15周を走るとフルマラソンの距離となります。この『ランニング』は冬休みも続きましたが、いつしか2人になり、そして独り。私の場合は、走り癖につき2周、3周と距離が増えて『キモチ良い汗』を体得することになりました。また、この反復が、私の人生としての歩みの心構えを育ててくれた心象を持ちます。



JRC2014時の早朝ラン企画のゴール風景。

そして、ふと気付けばランが日常になり、長居競技場にてサブトラックで独りぼっちのタイムレースに勤しんでいました。当時、1週300mのサブトラックは自由に出入りができ、大学と思われる陸上部がパフォーマンスをしていました。その刺激についつい同じように(笑)走ろうとしていた訳です。サブトラック5周で4分30秒を切ることを目標にして、アタックしていたことが懐かしく回想されます。そのラン後に覚える、…心臓が口からせり出すようなシンドさ、自身を追い込んだ達成感、バタンとトラックに倒れ込んで天を仰ぐ空景色、走行後の独特な臀部筋肉の痛み(乳酸?座骨神経の影響?)、等が走馬灯のごとし。よくテレビで目にするような一流ランナーの走りっぷりに『常人じゃない!』と啞然としつつ、素人ながらに少しでも近づきたいと夢憧憬していました。

ところで、ティーンエイジで積み上げた『キモチ良い汗』は

私に大きな影響を与えたようです。汗といえば、いろんな汗があります。JRC事業に照らすと、なんといってもプレゼンターとして緊張する汗、遣り甲斐の汗、そして焦りの汗、等々。JRC2016合同シンポジウムでAAPMのJohn M. Boone議長のお隣に座った際の緊張感での汗は忘れられませんし、JRC2018合同シンポジウムでのICRPのClaire Cousin委員長の前では遣り甲斐の汗でした。おのおのがシンポジストとして一入の感であり、ランで覚えた『キモチ良い汗』の感覚が、JRCへの臨み方に発展しているようです。因みにJRC会期はいつも朝ランを楽しんでおり、JRCのすべてが『キモチ良い汗』、舞台として私の楽しみ方の定番になっています。

更に以前を振り返ると、JRC2014でオリンピックのメダリスト有森裕子選手が招聘されての朝ラン企画が感激の思い出です。港町のコースで、有森選手のハイタッチをいただきテープを切れました。お写真ではスマートなゴール風景ですが、真相はそのゴール後にシンドさのあまりに地面にへたり込んでいました。ただ精一杯に走りあげた後の『キモチ良い汗』は充足の域…。コロナ禍の煽りでface to faceの企画が難しい今日ですが、世情が落ち着いてJRCでの朝ラン企画があれば是非とも疾走したいと思っています。

しかし、最近では昔の気分で攻撃的に走ると、なんと!まあ!膝に水が溜まる事態に遭遇しています(苦笑)。無茶ぶりができない年齢(身体)に一抹の寂しさがありますが、最近では景色を楽しむランの良さを学びました。学術活動で初めて訪れる地をユッタリとしたランで街中を知ることも格別な味わいです。これからも私の感性で『キモチ良い汗』として

市民公開講座の開催で訪れた仙台。
早朝ランで散策した仙台北城跡からの一望。

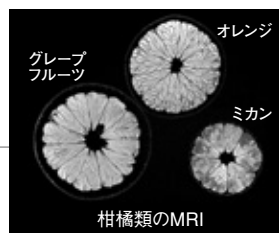


『ランニング』を楽しみたいと思います。JRCでの横浜、…朝の山下公園や港の見える丘公園辺りで見かけたら、ぜひお声をいただけたら嬉しく思います。笑顔にて朝のご挨拶ができれば!!!

お恥ずかしいながらの、眩きような私の趣味紀行を最後までお読みいただき、本当にありがとうございました。

恐惶謹言

編集後記



現在、様々な医療分野において必要不可欠となりつつある放射線医学について、多くの方々に理解を深めて頂くことを目的として広報誌ラジオロジーの第39号をお届け致します。“特集”は、MRリニアックを取り上げ、宇野隆先生に解説をお願いいたしました。近年、MRIを放射線治療装置に組み込んだMRリニアックが開発され、がん放射線治療に用いられるようになりました。MRリニアックの登場により、がんや正常組織の位置のより正確な評価、治療直前のMRI所見にもとづく再プランニング、放射線照射中のリアルタイムモニタなどが可能となりました。MRリニアックによる画像誘導は「放射線治療中の体内が見える化された」画期的な技術と言えます、これまで放射線治療において主流であったCTによる治療計画や画像誘導技術に革新的なパラダイムシフトを起こす可能性があります。本編では、MRリニアックの技術的特徴、MRリニアックによる画像誘導放射線治療の長所、MR画像誘導即時適応放射線治療、初期の臨床経験などについてわかり易く解説頂いていますので、ぜひご一読ください。“世界の街角から”は、渡邊嘉之先生にウズベキスタンのサマルカンドをご紹介頂きました。14世紀末から繁栄したティムール王朝の首都であった中世の面影を強く残す街で、世界遺産にも指定されています。また、青いタイルを多用したモスクを主体としたイスラム建築が多く“青の都”と言われているそうです。シルクロードのオアシスとして古くから栄え、食事も日本人の口に合うそうです。自由に海外旅行ができる時が来たら、旅行先候補として検討してみても如何でしょうか？“My Hobby”は、市田隆雄先生にランニングについて執筆して頂きました。市田先生は、“キモチ良い汗”をかくのが好きで、その中の一つが『ランニング』だそうです。中学時代の夏休みの早朝ランを起点に、日課として徐々に走る距離を増やして来られたそうです。最近、学会等での訪問先で、景色をユッタリと楽しむランで街中を知ることが格別だそうです。執筆いただいた先生方、どうもありがとうございました。

ご意見、お問い合わせなどがございましたらJRC事務局 (office@j-rc.org) までメールでお寄せください。
JRC広報委員



JRC
Japan Radiology Congress

監修 公益社団法人 日本医学放射線学会
<http://www.radiology.or.jp/public.html>
発行 一般社団法人 日本ラジオロジー協会
〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-8
神田駿河台ビル7F
TEL 03-3518-6111/FAX 03-3518-6139
<http://www.j-rc.org/>
発行日 2022年8月25日 第20巻第2号 通巻39号